



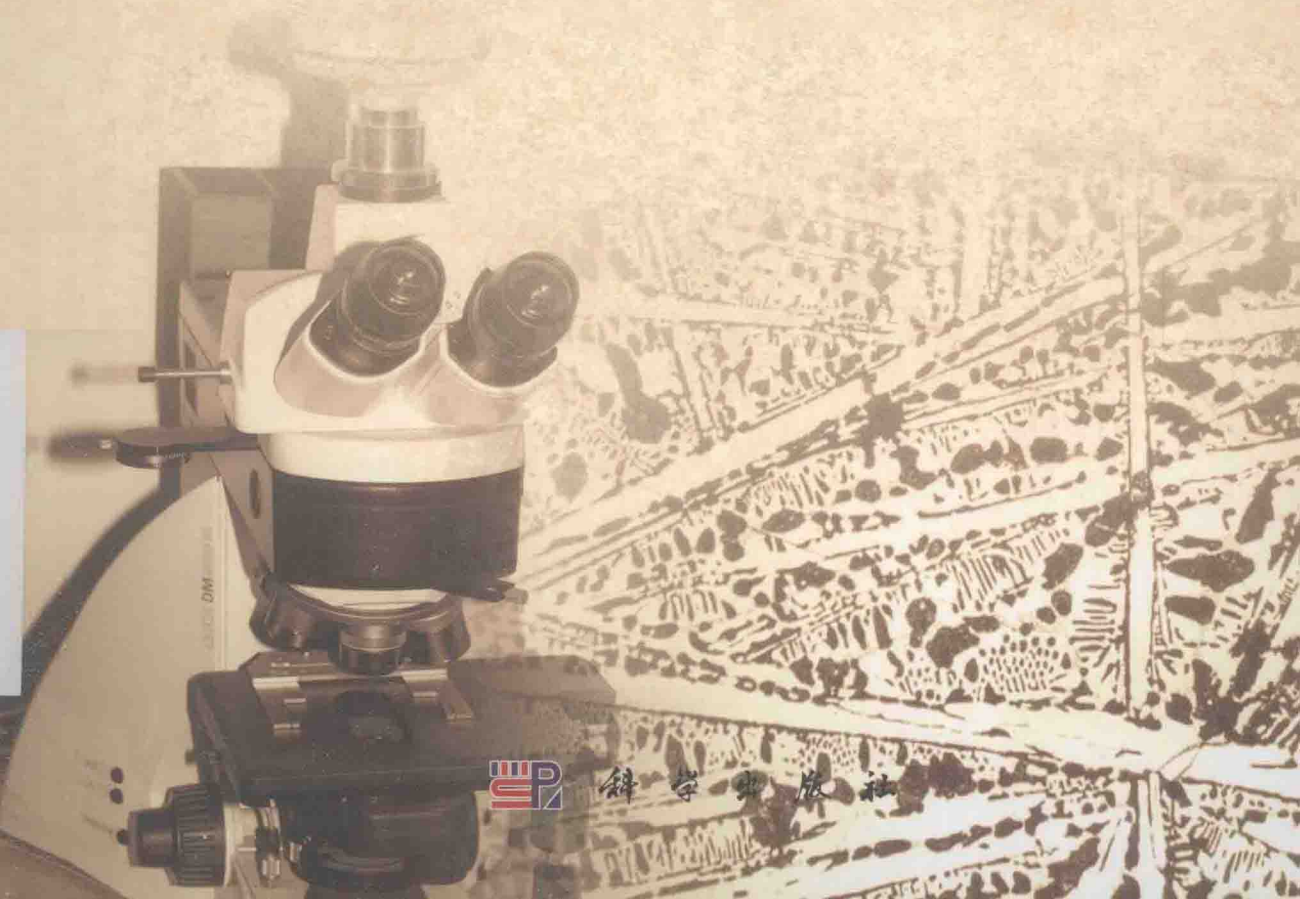
科学技术与文明研究丛书

主编/柯俊 梅建军

中国古代金属材料 显微组织图谱

总论

韩汝玢 孙淑云 李秀辉◎编著



科学出版社



科学技术与文明研究丛书

主编/柯俊 梅建军

中国古代金属材料 显微组织图谱

总论

韩汝玢 孙淑云 李秀辉◎编著



科学出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

中国古代金属材料显微组织图谱·总论/韩汝玢, 孙淑云, 李秀辉编著.

—北京: 科学出版社, 2014

(科学技术与文明研究丛书)

ISBN 978-7-03-042478-5

I. ①中… II. ①韩… ②孙… ③李… III. ①金属材料-相图-中国-古代
IV. ①TG113.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 264153 号

丛书策划: 胡升华 侯俊琳

责任编辑: 樊 飞 张文静 / 责任校对: 刘亚琦

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 无极书装

编辑部电话: 010-64035853

E-mail: houjunlin@mail.sciencep.com

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



2015 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 12 3/4 插页: 4

字数: 300 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



北京科技大学“211 工程”项目资助出版

科学技术与文明研究丛书

编 委 会

主 任 罗维东

主 编 柯 俊 梅建军

编 委 权良柱 韩汝玢 孙淑云

乔 兰 李延祥 李晓岑

李秀辉 潜 伟 章梅芳

总序

20 世纪 50 年代,英国著名学者李约瑟博士开始出版他的多卷本巨著《中国科学技术史》。这套丛书的英文名称是 *Science and Civilisation in China*,也就是《中国之科学与文明》。该书在台湾出版时即采用这一中文译名。不过,李约瑟本人是认同“中国科学技术史”这一译名的,因为在每一册英文原著上,实际均印有冀朝鼎先生题写的中文书名“中国科学技术史”。这个例子似可说明,在李约瑟心目中,科学技术史研究在一定意义上或许等同于科学技术与文明发展关系的研究。

何为科学技术?何为文明?不同的学者可以给出不同的定义或解说。如果我们从宽泛的意义去理解,那么“科学技术”或许可视为人类认识和改变自然的整个知识体系,而“文明”则代表着人类文化发展的一个高级阶段,是人类的生产和生活作用于自然所创造出的成果总和。由此观之,人类文明的出现和发展必然与科学技术的进步密切相关。中国作为世界文明古国之一,在科学技术领域有过很多的发现、发明和创造,对人类文明发展贡献卓著。因此,研究中国科学技术史,一方面是为了更好地揭示中国文明演进的独特价值,另一方面是为了更好地认识中国在世界文明体系中的位置,阐明中国对人类文明发展的贡献。

北京科技大学(原北京钢铁学院)于 1974 年成立“中国冶金史编写组”,为“科学技术史”研究之始。1981 年,成立“冶金史研究室”;1984 年起开始招收硕士研究生;1990 年被批准为科学技术史硕士点,1996 年成为博士点,是当时国内有权授予科学技术史博士学位的为数不多的学术机构之一。1997 年,成立“冶金与材料史研究所”,研究方向开始逐渐拓展;2000 年,在“冶金与材料史”方向之外,新增“文物保护”和“科学技术与社会”两个方向,使学科建设进入一个蓬勃发展的新时期。2004 年,北京科技大学成立“科学技术与文明研究中心”;2005 年,组建“科学技术与文明研究中心”理事会和学术委员会,聘请席泽宗院士、李学勤教授、严文明教授和王丹华研究员等知名学者担任理事和学术委员。这一系列重要措施为北京科技大学科技史学科的发展奠定了坚实的基础。2007 年,北京科技大学科学技术史学科被评为一级学科国家重点学科。2008 年,北京科技大学建立“金属与矿冶文化遗产研究”国家文物局重点科研基地;同年,教育部批准北京科技大学在“211 工程”三期重点学科建设项目中设立“古代金属技术与中华文明发展”专项,从而进一步确立了北京科技大学科学技

术史学科的发展方向。2009年,人力资源和社会保障部批准在北京科技大学设立科学技术史博士后流动站,使北京科技大学科学技术史学科的建制化建设迈出了关键的一大步。

30多年的发展历程表明,北京科技大学的科学技术史研究以重视实证调研为特色,尤其注重(擅长)对考古出土金属文物和矿冶遗物的分析检测,以阐明其科学和遗产价值。过去30多年里,北京科技大学科学技术史研究取得了大量学术成果,除学术期刊发表的数百篇论文外,大致集中体现于以下几部专著:《中国冶金简史》、《中国冶金史论文集》(第一至四辑)、《中国古代冶金技术专论》、《新疆哈密地区史前时期铜器及其与邻近地区文化的关系》、《汉晋中原及北方地区钢铁技术研究》和《中国科学技术史·矿冶卷》等。这些学术成果已在国内外赢得广泛的学术声誉。

近年来,在继续保持实证调研特色的同时,北京科技大学开始有意识地加强科学技术发展社会背景和社会影响的研究,力求从文明演进的角度来考察科学技术发展的历程。这一战略性的转变很好地体现在北京科技大学承担或参与的一系列国家重大科研项目中,如“中华文明探源工程”、“文物保护关键技术研究”和“指南针计划——中国古代发明创造的价值挖掘与展示”等。通过有意识地开展以“文明史”为着眼点的综合性研究,涌现出一批新的学术研究成果。为了更好地推动中国科学技术与文明关系的研究,北京科技大学决定利用“211工程”三期重点学科建设项目,组织出版“科学技术与文明研究丛书”。

中国五千年的文明史为我们留下了极其丰富的文化遗产。对这些文化遗产展开多学科的研究,挖掘和揭示其所蕴涵的巨大的历史、艺术和科学价值,对传承中华文明具有重要意义。“科学技术与文明研究丛书”旨在探索科学技术的发展对中华文明进程的巨大影响和作用,重点关注以下4个方向:①中国古代在采矿、冶金和材料加工领域的发明创造;②近现代冶金和其他工业技术的发展历程;③中外科技文化交流史;④文化遗产保护与传承。我们相信,“科学技术与文明研究丛书”的出版不仅将推动我国的科学技术史研究,而且将有效地改善我国在金属文化遗产和文明史研究领域学术出版物相对匮乏的现状。

柯俊 梅建军

2010年3月15日



金属及合金是人类历史迈向文明史的物质基础之一。中国古代冶金技术曾有过辉煌成就，并对中华民族的统一、生存和发展起了重要作用，但由于在古代，大多数人对冶金技术并不熟悉，甚至会轻视，所以史书中对冶金技术的记载很少，有些与事实差别很大；有些由于古文献记载年代久远或后人假记，或在成书时加入神秘内容使文献中对技术的记述实质不明，或涉及的文字含意不清，造成后来学者对其解释各异，无法轻易得到某项冶金技术；有些古文献佚失，重要的如《浸铜要略》《冶铁志》已佚，只留书名，对研究古代冶金技术造成了困难。另外，古代的一些冶金技术多为传统工艺，技术条件的控制多凭经验及操作熟练程度；还有由于古代原料来源的限制，一些制品多为重复使用。以上诸多原因使中国冶金始于何时何地，不同时期、不同地域有何特点等这些问题的认知需依赖考古发掘出土的金属文物为其提供重要线索。为此，1974 年柯俊教授组织并领导北京钢铁学院（现为北京科技大学）成立冶金史研究室（所），组成专职队伍，与文物考古部门密切合作，运用现代实验方法对考古发掘出土的金属文物和冶金遗物进行系统的分析与研究，以阐明中国冶金技术发展历程及其对中国社会、经济与文化的作用。经过 40 年的冶金史研究，柯俊教授组织的专职队伍取得了重大突破和重要成果，并积累了丰富的经验和技术资料。研究的文物材质包括铜及其合金、金银制品、铅锡及其合金、锌及其合金、不同的生铁制品、钢制品等。涉及种类众多，有容器、农具、工具、兵器、车马器、生活用品、装饰品等。这次研究的时间跨度大，几乎囊括了自中国开始使用金属（公元前 3000 年）以降约 5000 年的历史。

美国麻省理工学院材料科学、冶金史专家史密斯（C. S. Smith）教授提出，应该把考古材料中存储的有价值的信息尽可能地挖掘出来，因为在出土的金属文物中存在着许多有意义的信息。这些信息通常与制作技术有关，如使用的矿石、燃料的种类，冶炼技术，铸造、锻造方法，组织、成分及其均匀性、冷热加工情况，夹杂物分布及腐蚀状态等，涉及内涵十分丰富。这些信息也都可以用现代实验方法研究得到重要结果。但是，由于中国悠久的历史、朝代的更迭、民族的迁徙变化，加之风俗、信仰各具地域特色，文化技术交流频繁，冶金技术多凭经验等诸多因素，对金属文物的研究增加了许多困难。研究实践表

明，与文物考古工作者密切合作，取长补短，互通信息，遵守信誉，才能使研究工作科学、顺利地完成任务。正如柯俊教授教导的：冶金史研究是为文物考古学服务的。这也是搞好冶金史研究工作的前提。因此，对金属文物的科学分析和研究是非常必要的，是考古、文物保护、文化遗产及博物馆工作者应该重视的一项任务。中国冶金史的研究将为弘扬中华民族悠久历史，充实文化遗产内容，也将为阐明中国古代科学技术成就提供许多有力的实物证据。本书的任务是介绍我们所在进行显微组织研究时需要了解和学习的相关内容和经验，希望能为青年学者提供有益的参考价值。



总序/柯俊 梅建军/i

前言/iii

第一章 金属文物概述/1

第一节 金属文物分类/1

第二节 金属文物的诊断/3

第二章 金属文物的金相学研究要点/6

第一节 古代铜器的鉴定/6

第二节 古代铁器的技术鉴定/8

第三章 金属文物显微组织的分析/14

第一节 金属文物的显微组织金相学研究/15

第二节 金属文物金相学研究常用的相图/21

第四章 光学显微技术/77

第一节 光学金相显微镜/77

第二节 实体显微镜及其在金属文物研究中的应用/84

第三节 金属文物金相样品的制备/86

第四节 偏光显微镜在金属文物显微组织研究中的应用/94

第五节 显微硬度仪的使用/100

第五章 金属文物的成分分析/105

第一节 化学分析方法/105

第二节 原子吸收光谱分析仪/107

第三节 电感耦合等离子体发射光谱/110

第六章 20 世纪揭开研究微观世界序幕的三大发现/113

第一节 X 射线的发现与产生/114

第二节 放射性的发现/115

第三节 电子的发现/117

第七章 X 射线成像技术/120

第一节 X 射线成像仪的发展/120

第二节 X 射线成像检测技术/121

第三节 X 射线成像检测技术在文物领域的应用/125

第八章 X 射线荧光分析法/128

第一节 概述/128

第二节 基本原理/129

第三节 X 射线荧光光谱分析仪器的结构与种类/130

第四节 使用 XRF 仪器对金属文物进行成分测定/131

第九章 X 射线衍射分析技术/142

第一节 X 射线衍射的基本原理/142

第二节 X 射线衍射方法/143

第三节 X 射线衍射法进行金属文物显微研究实例/145

第十章 电子显微技术在冶金考古中的应用/151

第一节 电子与物质的交互作用/151

第二节 电子显微镜与扫描电子显微镜发展史/159

- 第三节 扫描电子显微镜基本原理与实验方法/163
- 第四节 扫描电镜 X 射线能谱分析/166
- 第五节 电子探针显微分析技术/174
- 第六节 电子光学微观分析仪器/180

第十一章 研究方法及实例/182

- 第一节 古代文献的搜集与整理/182
- 第二节 与考古学者合作进行调查研究/183
- 第三节 样品的检测分析与模拟实验/184
- 第四节 综合研究与社会发展史结合的方法/186
- 第五节 多学科结合的方法/188
- 第六节 揭开古铜镜表面“漆古”形成的秘密/189

后记/195

第一章

金属文物概述

第一节 金属文物分类

对出土的金属文物有两种分类方法：考古学按金属文物的用途和类型分类；冶金考古学按金属文物的材质、制作技术分类。若将二者的分类方法相互印证及补充，可以揭示金属文物内存在的更多信息。

一、古代金属文物材质

金 (Au)、银 (Ag)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、铅 (Pb)、锡 (Sn)、汞 (Hg)、锌 (Zn)、锑 (Sb) 等金属元素及其合金，已发现的材质有红铜、砷铜、锡青铜、铅青铜、铅锡青铜、锑青铜、黄铜、铅黄铜、砷白铜、镍白铜、纯铅、纯锡、铅锑和铅锡合金、纯金、纯银、金银合金、银铜合金、金汞齐、陨铁（铁镍合金）、熟铁和不同含碳量的钢、白口铁、灰口铁、韧性铸铁等。材质不同金属文物显示的金属组织各异，这与金属文物的制作技术密切相关。

金属文物的制作技术涉及多种，是影响金属文物使用、性质及埋藏环境中变化的重要原因。已发现金属文物的制作技术有以下五种。

(1) 铸造技术：包括石范法和泥范法（分铸、浑铸、铸镶法，铭文与纹饰的制作，垫片及浇冒口的设置，以及叠铸法等），金属范（铸铁模、范及铜模、范）、失蜡法和砂型法、大型金属器物的制作等。

(2) 锻造技术：冷锻、铸后冷加工，热锻，大型锻件的制作等。

(3) 热处理技术：退火、淬火、渗碳、生铁淋口等。

(4) 镶嵌技术：铸镶红铜、错金、错银、金银错等。

(5) 表面装饰技术：贴金箔、鎏金、鎏银、镀锡等。

二、考古学对金属文物的分类

考古学者常用的方法是按照用途和性质进行分类。以按器物用途分类为例。首先，根据器物使用用途的不同，将金属文物分为农具、工具、兵器、饪食器、酒器、盥水器、乐器、杂器等类。其次，按各类金属文物在同一时期所呈现的不同形态及同一形态在不同时期的变化，将其分为型或式，有时型可再分亚型。这种方法是中国考古类型学重要而独特的成就。本书是对我国出土的各类金属文物的显微组织及成分特征进行展示，采取的分析方法与考古类型学的分析方法密切相关，即按出土金属器物的用途分类进行研究。

1. 农具

有铜和铁两种材质。关于青铜农具是否对中国古代社会农业生产起过作用，虽然学术界曾有过不同的意见，但随着考古发掘出土农具的不断增多，也证明了青铜农具在中国古代社会经济发展中的作用日趋明显；铁制的农具对封建社会经济发展的推动作用肯定的，这一点得到了学术界的一致认同。青铜农具的种类包括耒、耜、铲、镢、铤、锄、镰等，而铁农具包括犁铧、耒铧、犁镜、耜、铲、锄、铤、镰、镢、铤等。

2. 铜、铁工具

商周时期，青铜工具出土数量不少，砍伐工具斧和斤在农业和手工业中均使用。铤不仅可以用于开垦土地，还是土木的主要工具。铁质斧、铤工具的功能由于装柄方式的改变，在战国秦汉时期的农业生产中起了重要的作用。包括斧、斤、铤、凿、锯、削刀、锥等。

3. 兵器

分冷兵器和火器。材质亦可分为铜和铁两种。

铜冷兵器：戈、戟、矛、刀、钺、匕首、剑、锤、箭镞、弩机、盾、铠甲等。

铁冷兵器：刀、环首刀、长剑、短剑、枪、矛、铠甲、铁蒺藜、鞭等。

铜火器：火铳、手铳、鸟铳、火炮、加农炮等。

铁火器：前装臼炮（山西博物馆藏 1377 年制造的最早铸铁火炮）、仿葡萄牙 1593 年制造的后装大将军铁炮、铸铁子母炮、手雷等。

各类兵器在不同时代、不同地区的形制均有变化，这与军事征战需要、战术变化有关，边远地区的冷兵器又有改进，研究各时期出土工具和兵器的制作技术特点是冶金考古工作者的重要任务。

4. 青铜礼器

早在夏王朝时期，中国就已有较发达的青铜冶铸业，如在河南偃师二里头

遗址中就发现了许多的青铜器，其性质属于二里头文化。在商王朝时期，青铜礼器就已出现。青铜礼器的种类繁多，包括饪食器、酒器、水器、杂器、乐器等。商周时期青铜礼器制作精美，不同时代、不同地区出土的器具组合、形制及纹饰很有特色。关于青铜礼器形制、纹饰、铭文、成分、组织及器物的铸造方法等的研究，国内外许多学者已从不同的角度进行系统全面的研究，并得到了显著成果。

(1) 饪食器 包括鼎、甗、鬲、簋、盂、尊、豆、孟、盆等。其中，鼎有圆鼎、鬲鼎、扁足鼎、方鼎等。

(2) 酒器 爵、角、觚、斚、尊、壶、觶、盃、方彝。

(3) 水器 鉴、盘、汲壶、匜、甬、卣等。

(4) 乐器 饶、钲、钟、铎、铃、鐃于、鐃、鼓等。

5. 生活用具

发现种类较多，除铜镜有专项研究的生活用具外，其余研究均较少，包括剪、镜、带钩、耳杯、熏炉、鏃斗、灯、摇钱树、棺钉、锁等。

6. 车马器

发现于商代晚期的有马拖驾木车实物。中国古代马车的轭靴式系驾方式是我国早期驾车技术的一项发明^①。随着我国考古文物工作的蓬勃发展，有关古代战车，车战兵器装备考古新发现层出不穷，发现有当卢、鐃、銮铃、节约、车饰、轴饰、衡饰、舆饰、辕首饰、马冠、马鞍、铁马掌、马镫、铁锚等。但对出土车马器材的金相学研究较少。

7. 饰品

出土的数量和类型众多，如耳饰、指环、项饰、腕饰、牌饰、扣饰、发饰等；其中使用的材质有纯铜、砷铜、青铜、黄铜合金；金银及其合金在此类考古文物中数量最丰富，反映了先民的民俗、信仰、艺术审美等情况。

8. 大型金属制品

佛像、天文仪器、寺庙法器、旗杆、铜牛等，因中国是发明和推广使用铸铁最早的国家，公元七世纪许多大型铸铁件作为历史见证至今屹立在中华大地许多寺庙和庭院之中。如铁牛、铁狮、铁柱、铁桥、铁人、铁塔等。

此外，还有各种金属货币、度量衡器具、符和玺印等。

第二节 金属文物的诊断

由考古学对出土金属文物的分类可明显看到 5000 年灿烂的中华文明展示有多

^① 杨泓：《中国古兵与美术考古论集》，文物出版社，2007 年，119 页。

么丰富而众多的金属文物，四十年对金属文物制作技术的研究只显示其冰山一角，还需要更多年轻科技史工作者开展多学科、多视角的专题研究，在时代、技术、材料的空间，再现金属文物的特点及内涵、文化技术的多民族融合、交流及对社会历史的推动作用，只要喜欢是大有可为的。

一、出土铜器的诊断

对于金属文物必须确认其来源，并有针对性地予以“诊断”。若为发掘出土的金属文物，必须了解其发现的背景资料，即出自墓葬、遗址还是灰坑？出土位置及地层情况，判定年代的依据，涉及金属器物的类型和材质，埋藏环境及锈蚀状况，该墓葬或遗址反映的特点与历史文化背景资料等。若得到的是传世、捐赠或收购的金属文物，对其来源、器物类型、造型、纹饰及材质都要予以特别关注。下面对通过以上两种途径获得铜器的诊断方法做一简单介绍。

1. 对出土铜器的诊断

(1) 了解文物出土的历史背景、时代、墓主人、出土放置位置等有关资料，且对属于公元前 16 世纪以前的出土铜器要给予特别的关注。

(2) 采用 X 射线照相及探伤的方法，对铜器的锈层厚度、内部状态、残断情况、修补部位、纹饰及铭文、镶嵌及铸造技术的痕迹等进行分析。

(3) 分析检测锈蚀产物类型，如有无有害锈（与铜器成分、组织及制作技术和埋葬环境有关）。

(4) 清洗去污，确定修复技术保护方案及实施细则，详细记录、照相并存档。

(5) 诊断后要有目的地进行分类，选择有代表性的出土铜器或残片进行无损或微损的分析，开展多学科互相结合的专项研究，尽量发掘其中包含的有用的技术信息。

2. 对收购及传世铜器的诊断

了解与收购的铜器相关的出土文物的资料，包括对此文物的类型、纹饰、时代特征、制作技术特点等进行认真观察与研究，要进行成分分析及实体显微镜观察，争取做细致的鉴定研究，进行对比辨伪鉴定，提出有科学根据的报告。

二、出土铁器的诊断

对铁器的诊断，与铜器诊断方法大致相同。下面仅对出土铁器的诊断方法作简要介绍。

了解铁器文物出土的历史背景、时代、墓主人、位置等有关资料，尤其对公元前 5 世纪以前的铁器要给予特别的关注。对判定铁器的种类、材质，有条件要进

行取样或进行稳定性检测、氯离子的检测等。对锈蚀程度的诊断,最好对出土铁器进行 X 射线照相,可以了解铁器锈蚀情况、锈层厚度、有无纹饰或铭文、有无不同材质的镶嵌等。确定修复技术方案、实施,详细记录、存档。选择有代表性的出土铁器或残片进行微损分析,开展多学科互相结合的专项研究,尽量发掘其中包含的有用的技术信息。